

· 特邀综述 ·

矢量光场与激光焦场定制

陈建¹, 詹其文^{1,2*}

¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

²代顿大学电光学与光子学系, 俄亥俄州 代顿 45469

摘要 概述了矢量光场的基本理论及常见的生成方法, 详细介绍了基于空间光调制器的矢量光场生成系统及性能改善方法。回顾了强聚焦下的矢量衍射理论, 重点介绍了激光焦场强度分布、偏振指向及自旋指向的定制方法; 介绍了定制焦场在显微成像、定向耦合等方面的应用。

关键词 物理光学; 偏振态; 矢量光场; 焦场定制; 矢量衍射; 微纳光学

中图分类号 TN241

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0126002

Tailoring Laser Focal Fields with Vectorial Optical Fields

Chen Jian¹, Zhan Qiwen^{1,2*}

¹School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

²Department of Electro-Optics and Photonics, University of Dayton, Dayton, Ohio 45469, United States of America

Abstract The basic theory and common generation methods of vectorial optical fields are reviewed. The vectorial optical field generator based on spatial light modulator and its recent improvements in performances are introduced in detail. An overview of the vector diffraction theory under tightly focusing is offered, and the methods for tailoring the intensity distribution, polarization direction and spin orientation within the optical focal fields are highlighted. The applications of the tailored focal field in microscopy, directional coupling and so on are briefly discussed.

Key words physical optics; polarization state; vectorial optical field; focused field tailoring; vector diffraction; micro-nano optics

OCIS codes 260.5430; 260.1960; 350.3950

1 引 言

偏振是光的重要矢量特性之一, 被广泛应用于光学理论及工程的多个方面。一般情况下, 研究人员主要关注具有空间均匀偏振态(SOP)的光场, 例如线性、椭圆以及圆偏振态光场, 此时 SOP 与光束横截面的空间位置无关。近年来, 随着高运算能力和纳米加工技术的快速发展, 在横截面内具有空间不均匀 SOP 的矢量光场受到了研究人员的广泛关注, 他们通过数值仿真和实验对这种光场的性质进行了研究。光的矢量本质及其与物质的相互作用, 使许多光学设备和光学系统的设计成为可能。通过有目的且细致地在空间上排列光束的 SOP, 有望产

生新的效果与现象, 进而扩展光学系统的功能, 并增强其性能。矢量光场及其与物质的相互作用在光学检测和计量^[1-4]、光信息存储^[5-10]、谐波生成^[11-13]、光学微操纵^[14-20]、自旋控制定向耦合^[21-30]、高分辨显微成像^[31-37]、大容量光通信^[38-42]、光学微纳加工^[43-45]等领域具有广阔的应用前景。

早期, 对矢量光场的研究主要集中于特殊类型的柱矢量(CV)光束, 相关研究成果已在文献[46-52]中进行了总结。世界各地的科学家和研究人员不断地在矢量光场领域提出新概念, 并开发相应的生成、表征及应用技术。目前, 用于生成各种矢量光场的商业产品也开始进入光学研究的主流, 复杂光场在新领域中的应用不断出现。本文旨在概述这一重要新

收稿日期: 2018-09-10; 修回日期: 2018-10-16; 录用日期: 2018-10-22

基金项目: 国家自然科学基金(61805142)

* E-mail: qzhan1@udayton.edu

兴光学领域在若干方面的现状,并介绍该领域的部分最新进展。介绍了广义矢量光场的数学描述和两个特殊例子:CV 光束和 Full Poincaré(FP)光束,并回顾了矢量光场的一般产生方法。着重介绍了基于空间光调制器(SLM)的矢量光场生成系统(VOF-Gen)及其性能改进方法。回顾了强聚焦下的矢量衍射理论,并详细介绍了利用矢量光场产生不同特性激光聚焦的基本方法,最后展望了矢量光场的潜在应用。

2 矢量光场的原理及生成方法

2.1 矢量光场的数学表述

矢量光场通常具有非均匀的相位、幅度及偏振态分布,广义的矢量光场在数学上可以分解为两个正交分量,可以表示为

$$\mathbf{E}_d(x, y) = A_d(x, y) \exp[j\phi_d(x, y)] \times \begin{bmatrix} E_{xd}(x, y) \\ E_{yd}(x, y) \exp[j\delta_d(x, y)] \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: $A_d(x, y)$ 为幅度分布; $\phi_d(x, y)$ 为 x 分量和 y 分量的共同相位,琼斯向量包含了矢量光场的偏振信息; $E_{xd}(x, y)$ 和 $E_{yd}(x, y)$ 为归一化的幅度分量, $E_{xd}^2(x, y) + E_{yd}^2(x, y) = 1$; $\delta_d(x, y)$ 为两个分量的相位差。

在诸多矢量光场中,一种特殊类型的光场为 CV 光束,它是麦克斯韦方程的矢量解,在幅度和相位上都遵循轴对称性^[53]。根据电场的全矢量方程,角向偏振贝塞尔-高斯光束的形式为

$$\mathbf{E}_\varphi(r, z) = U(r, z) \exp[j(kz - \omega t)] \mathbf{e}_\varphi, \quad (2)$$

式中: $r = \sqrt{x^2 + y^2}$; z 为光束的传播距离; $U(r, z)$ 为光束的复振幅分布; t 为时间; ω 为角频率; $k = 2\pi/\lambda$ 为波数,其中 λ 为入射光的波长; \mathbf{e}_φ 为沿角向的单位向量。在傍轴和慢变包络近似下, $U(r, z)$ 的一种可能的表达式为

$$U(r, z) = E_0 J_1 \left(\frac{\beta r}{1 + jz/z_0} \right) \exp \left[-\frac{j\beta^2 z / (2k)}{1 + jz/z_0} \right] u(r, z), \quad (3)$$

式中: E_0 为光场在坐标原点的振幅; z_0 为瑞利距离; β 为恒定比例参数, $J_1(x)$ 为第一类一阶贝塞尔函数; $u(r, z)$ 为基本高斯解,其表达式为

$$u(r, z) = E_0 \frac{\omega_0}{\omega(z)} \exp[-j\phi(z)] \exp \left[j \frac{k}{2q(z)} r^2 \right], \quad (4)$$

式中: $\phi(z)$ 为 Gouy 相移, $\phi(z) = \arctan(z/z_0)$; $q(z)$ 为波束复参数, $q(z) = z - jz_0$; ω_0 为束腰;

$\omega(z)$ 为光束的半径。相应地,另一种很重要且应用广泛的是径向偏振 CV 光束,其在束腰位置的贝塞尔-高斯模的近似表达式(当 β 很小时)为

$$\mathbf{E}_r(r, z) = A r \exp \left[-\frac{r^2}{\omega_0^2} \right] \mathbf{e}_r, \quad (5)$$

式中: \mathbf{e}_r 为角向单位向量; A 为常数。更进一步,广义 CV 光束可表述为

$$\mathbf{E}(r, \varphi) = L(r) [\cos \varphi_0 \mathbf{e}_r + \sin \varphi_0 \mathbf{e}_\varphi], \quad (6)$$

式中: $L(r)$ 为 CV 光束的复分布函数; φ_0 为常量,控制径向分量和角向分量之间的比例。

近年来,另一种更复杂的 FP 波束引起了越来越多的关注。FP 波束是一种特殊的矢量光场,其 Stokes 参数的投影覆盖了整个庞加莱球^[54]。FP 光束可以在近轴区域内表示为高斯基模和具有正交偏振的螺旋相拉盖尔-高斯(LG)模的组合,具体表达式为

$$\mathbf{E}_P(\mathbf{r}; \gamma, \phi_0, \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2) = \cos \gamma \mathbf{e}_1 U_{00}(\mathbf{r}) + \exp(j\phi_0) \sin \gamma \mathbf{e}_2 U_{0\pm 1}(\mathbf{r}), \quad (7)$$

式中: \mathbf{e}_1 和 \mathbf{e}_2 为任意两个正交的单位矢量; ϕ_0 为恒定相位; \mathbf{r} 为任意一点的笛卡尔坐标;参数 γ 控制光束的强度分布; $U_{0\pm 1}(\mathbf{r})$ 为具有单位轨道角动量的最低阶 LG 光束; $U_{00}(\mathbf{r})$ 为高斯波束,其表达式为

$$U_{00}(\mathbf{r}) = \frac{u_0}{\xi(z)} \exp \left[jkz - \frac{\rho^2}{\omega_0^2 \xi(z)} \right], \quad (8)$$

式中: $\xi(z) = 1 + j2z/(k\omega_0^2)$; u_0 为波束在原点处的幅度; ρ 为 xy 面内的极径。

$U_{0\pm 1}(\mathbf{r})$ 的表达式为

$$U_{0\pm 1}(\mathbf{r}) = 2u_0 \frac{\rho}{\omega(z)} \exp \{ j[\pm \phi - \phi_\xi(z)] \} \times \exp \left[jkz - \frac{\rho^2}{\omega_0^2 \xi(z)} \right], \quad (9)$$

式中: $\phi = \arctan(y/x)$; $\omega(z) = \omega_0 |\xi(z)|$; $\phi_\xi(z) = \arg[\xi(z)]$ 。

2.2 矢量光场的生成方法

根据生成方法是否涉及增益介质,矢量光场的生成方法可以分为有源型和无源型。通常情况下,有源型方法使用激光腔内装置,迫使激光器以矢量模式振荡。腔内装置可以是轴向双折射(固有双折射、形成双折射或诱导双折射)部件或轴向二向色元件^[55-59],用于辨别基模的模式。在最早使用腔内轴向双折射元件生成矢量光场的实验装置中,实验人员在望远镜中放置了一个晶轴平行于腔光轴的方解石晶体。由于双折射,反常偏振(e 偏振)和正常偏振(o 偏振)经历略微不同的放大率,因此,利用中心遮光光阑

将其中的一束光遮挡掉,就可以筛选出某一种极化。整个系统的圆柱对称性确保了振荡模式具有圆柱偏振对称性,并且方解石具有负双折射特性,在该装置中可直接产生角向偏振光束。利用光学活性材料(石英)使电场旋转 90° ,可产生径向偏振。随着微纳加工技术的进步,研究人员可以制造出衍射相位板或偏振选择性端面镜,用于生成矢量光束^[60-61]。这种类型的器件可以使激光器更加紧凑,并且可以产生高功率输出。此外,有源矢量光场生成方法还包括基于光纤激

光器的模式耦合法^[62-63]、数字激光法^[64]等。Zhou等^[65]设计了一个中心波长为 $1.6\ \mu\text{m}$ 的光纤激光器,它能够产生可切换的径向和角向偏振光束,实验装置如图1所示,将含有c型切割方解石晶体的三透镜望远镜插入掺铒光纤激光器的谐振腔中,由于方解石晶体的轴对称双折射性,因此径向和角向偏振模式在腔中具有空间上分离的焦点。通过平移望远镜的一个透镜,可以实现径向和角向偏振输出之间的切换。两种偏振模式下的输出功率均大于 $135\ \text{mW}$ 。

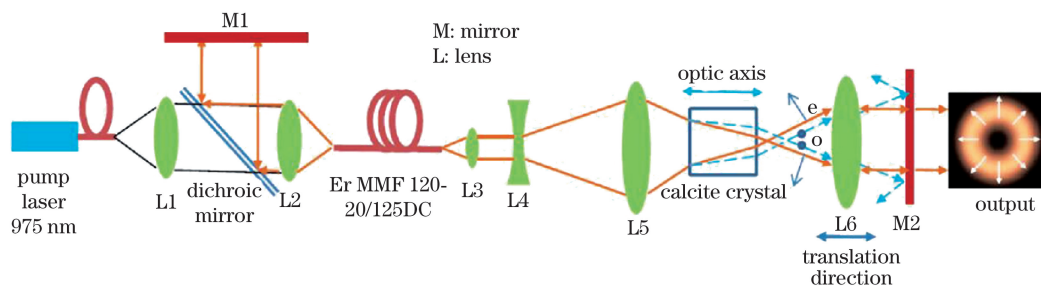


图1 用于产生径向和角向偏振模式的掺铒光纤激光器^[65]

Fig. 1 Erbium-doped fiber laser used for generating radially and azimuthally polarized modes^[65]

尽管矢量光场的有源生成方法发展迅速,但可得到的输出模式的复杂性仍然受到了激光谐振器的限制。利用无源器件定制光场可以克服这一缺点,为生成更复杂的矢量光场提供了极大的灵活性。无源方法将常见的空间均匀偏振光束转换为空间非均匀偏振光束,因此,通常需要具有空间变化的偏振特性的器件。例如,由径向检偏仪和螺旋相位器件(SPE)搭建的简易装置可用于生成CV光束^[46]。这里的径向检偏仪可以使用双折射材料^[4]或二向色材料^[66]制成,其各点透光轴沿径向或角向分布。使用圆偏振准直光束作为径向检偏仪的输入,根据检偏仪的类型,在检偏仪后将获得径向或角向偏振光。空间变化的偏振旋转亦可以用于生成矢量光束,在这种情况下,线性偏振光通常用作输入,本地旋转到所需的偏振模式^[67-68]。另一种应用广泛且功能强大的无源方法是使用液晶(LC)空间光调制器(SLM)。LC-SLM具有宽波段、宽双折射率范围、高损伤阈值、小体积、低功耗、灵活的可编程性及高分辨率等特点,使生成几乎任意的复杂矢量光场成为可能,研究人员对该方法展开了大量的理论与实验研究^[69-80]。Ping等^[81]在实验中利用SLM生成了径向偏振多高斯谢尔模光束。Liu等^[82]基于单块相位型SLM提出了一种生成可调矢量光束的高效稳健的方法,实验装置如图2所示,其中 s 分量为垂直偏振分量, p 分量为水平偏振分量, $\lambda/2$ 为二分之一波片, $\lambda/4$ 为四分之一波片, λ 为波长。当所用

SLM的反射率为 62% 时,线性偏振高斯光束转换成矢量光束的最高转换效率可高达 47% 。

3 基于SLM的矢量光场生成系统

如2.2节所述,LC-SLM具有诸多优点,已成为主流的矢量光场生成工具。由(1)式可知,为完全描述一个矢量光场,通常需要用4个自由度,即相位、幅度、偏振比以及 x 分量和 y 分量的相位差。因此,为生成任意的复杂矢量光场,一个通用型的VOF-Gen要能够独立控制这4个参量。基于高分辨率二维LC-SLM,Han等^[83-85]构建了如图3所示的VOF-Gen系统,每块LC-SLM均被分成两部分,每部分对应一个自由度,即第1~第4部分分别对应相位、幅度、偏振比及两个分量的相位差。为使VOF-Gen中光波的衍射效应最小化,在VOF-Gen中引入了 $4f$ 系统(f 为焦距)将光场从LC-SLM的一个部分中继到下一个部分,或者将光场从LC-SLM的第4部分中继到CCD相机上,以测量出射光斑的光束轮廓。透镜L1与反射镜M2以及透镜L4与反射镜M3组成的均是反射型 $4f$ 系统;透镜L2与L3以及透镜L5与L6组成的是透射型 $4f$ 系统。偏振片P1与二分之一波片(HWP)的组合用来调整入射光的强度。因为非偏振分束器(NPBS)对入射光的偏振态不敏感,故被用于正确引导光束的传播方向。LC-SLM的第2部分与四分之一波片(QWP)组成了一个偏振旋转器,该偏振旋转装置与

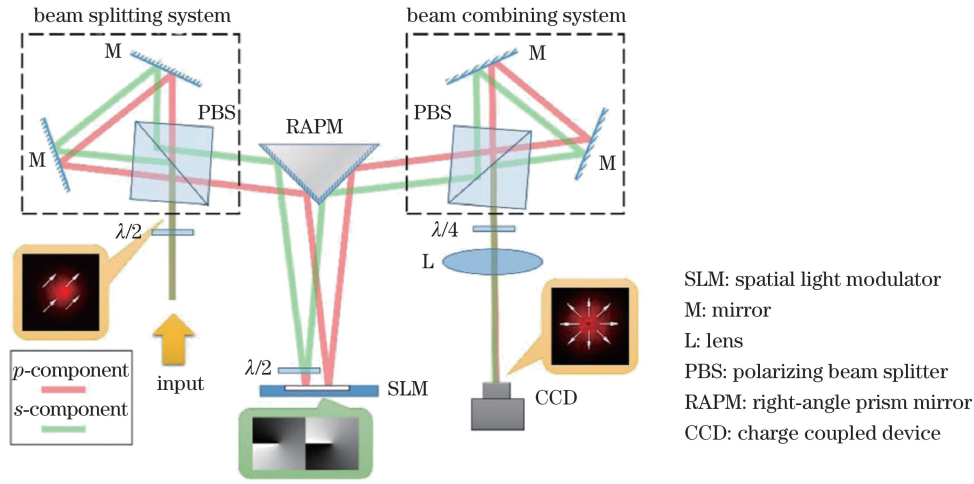


图 2 矢量光束生成装置^[82]

Fig. 2 Experimental setup used for generating vectorial beams^[82]

水平偏振片 P2 配合, 可以实现光场的幅度调制。位于两个透射型 4f 系统的傅里叶面上的空间滤波器 SF1 和 SF2 用于抑制由体立方分束器引起的高阶衍射级次。另外, 在两个相邻的 NPBS 之间放置不透明纸板, 目的是阻挡因光束的直接传播而引起

的串扰。取 LC-SLM 第 1 部分的坐标系为参照坐标系, LC-SLM 第 2 部分的横纵坐标与参照坐标系相比均旋转了 180°; 对于 LC-SLM 的第 3 部分, 只有横坐标旋转了 180°; 在 LC-SLM 的第 4 部分, 只有纵坐标旋转了 180°^[84]。

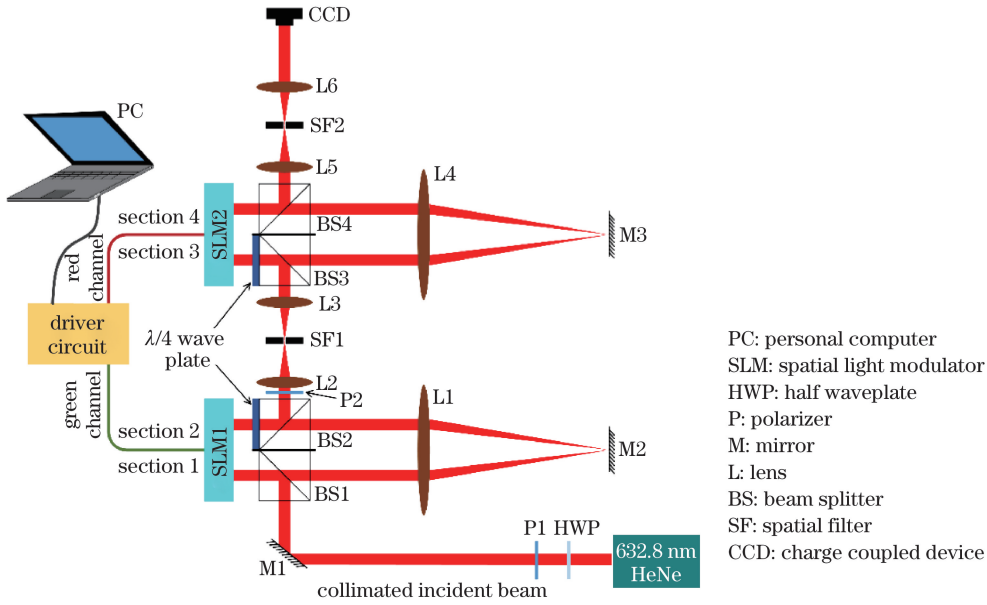


图 3 VOF-Gen 系统原理图^[83]

Fig. 3 Schematic of VOF-Gen system^[83]

该 VOF-Gen 系统可以在像素级上实现对矢量光场 4 个自由度的完全独立控制, 能够生成具有任意相位、幅度及偏振(包含偏振比和两个分量的相位差)分布的目标光场。LC-SLM 4 部分上的相位图计算公式分别为

$$\phi_2(x, y) = 2\arcsin\left[\frac{A_d(-x, -y)}{E_i(-x, -y)}\right], \quad (10)$$

$$\phi_3(x, y) = 2\arctan\left(\frac{|E_{yd}(-x, y)|}{|E_{xd}(-x, y)|}\right) - \pi, \quad (11)$$

$$\phi_4(x, y) = -\delta_d(x, -y), \quad (12)$$

$$\phi_1(x, y) = \phi_d(x, y) - \frac{\phi_2(-x, -y)}{2} - \frac{\phi_3(-x, y)}{2} - \pi, \quad (13)$$

式中: $E_i(-x, -y)$ 为入射光场的幅度分布。

在该开环结构的基础上,该团队将 CCD 相机采集到的信号直接输入到控制 LC-SLM 的计算机中,进一步构建了 VOF-Gen 的自适应闭环结构,闭环控制流程图如图 4 所示^[86],其中 RGB 为红绿蓝通道,ASCII 为美国信息交换标准代码。闭环结构中所用的 CCD 相机需要具备高分辨率、宽动态范围、可调视场域以及适用于多频谱等特点。用该自适应闭环校正 VOF-Gen 偏振调制的结果如图 5 所示,其中绿色虚线标注的是偏振仰角 α 的设定值,红色实线标注的是椭圆率 ϵ 的设定值。可以看出,该闭环结构可以显著提高 VOF-Gen 的偏振调制精度。此外,根据不同的应用场合,亦可设计相应的目标函数,将该闭环结构用于光束整形、自适应光学、波前优化、算法验证等领域。

4 强聚焦下的矢量衍射理论

矢量光场被高数值孔径的透镜聚焦后的特性可以通过 Richards-Wolf 矢量衍射方法进行数值分析^[46,87-88]。矢量光场强聚焦的几何示意图如图 6 所示,其中 O 为坐标系原点。假定入射场是广义的平面矢量光场,此时在孔径面的柱坐标系下入射矢量

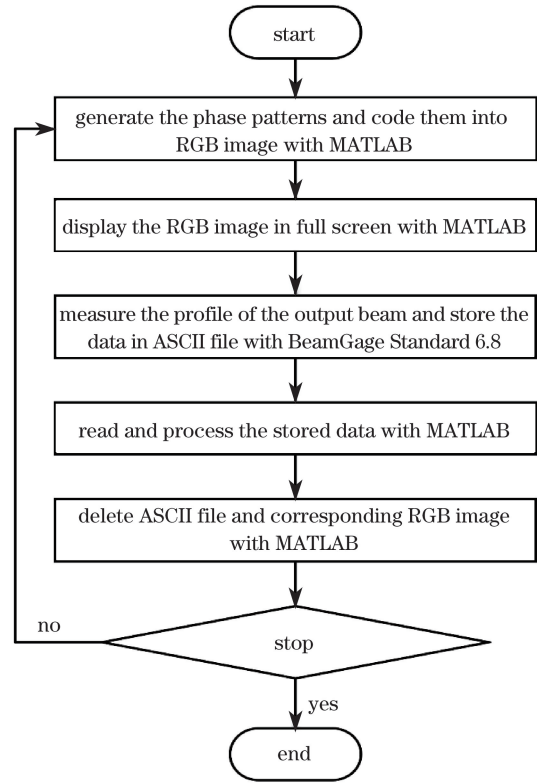


图 4 VOF-Gen 的自适应闭环控制流程图^[86]

Fig. 4 Flow chart of adaptive close loop control in VOF-Gen^[86]

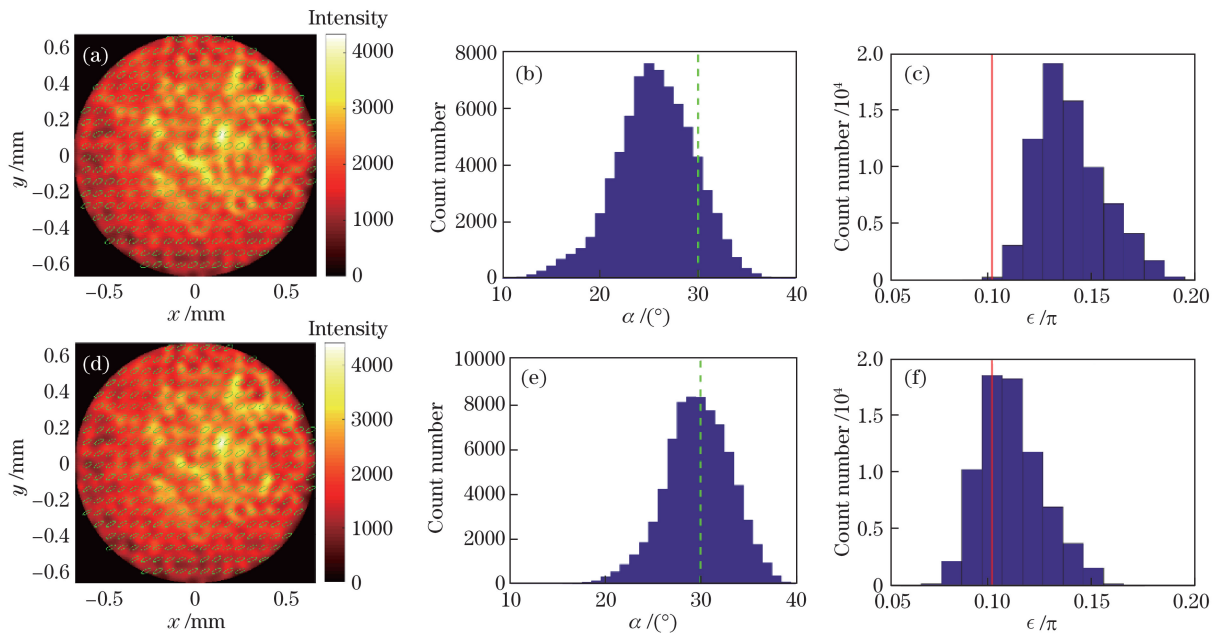


图 5 生成椭圆偏振光束的实验结果^[86]。(a)未校正时输出光束的强度及偏振分布;(b)未校正时光束偏振仰角的直方图;(c)未校正时光束椭圆率的直方图;(d)校正后输出光束的强度及偏振分布;(e)校正后输出光束偏振仰角的直方图;(f)校正后输出光束椭圆率的直方图

Fig. 5 Experimental results of elliptically polarized beam generation^[86]. (a) Intensity and ellipticity distribution of output beam before calibration; (b) histogram of elevation angle before calibration; (c) histogram of ellipticity before calibration; (d) intensity and ellipticity distributions of output beam after calibration; (e) histogram of elevation angle after calibration; (f) histogram of ellipticity after calibration

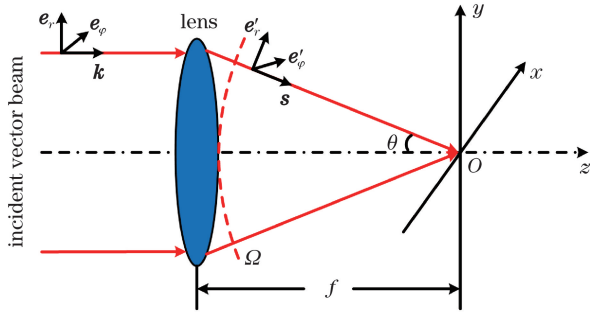


图 6 矢量光场强聚焦示意图^[46]

Fig. 6 Schematic of tightly focusing of vectorial optical field^[46]
光场可以表述为

$$\mathbf{E}_i(r, \varphi) = L_1(r, \varphi)\mathbf{e}_r + L_2(r, \varphi)\mathbf{e}_\varphi, \quad (14)$$

式中: $L_1(r, \varphi)$ 和 $L_2(r, \varphi)$ 为两个正交分量的分布函数, 可以是复函数; 径向和角向单位向量分别为 $\mathbf{e}_r = \cos\varphi\mathbf{e}_x + \sin\varphi\mathbf{e}_y$ 和 $\mathbf{e}_\varphi = -\sin\varphi\mathbf{e}_x + \cos\varphi\mathbf{e}_y$, 其中 \mathbf{e}_x 、 \mathbf{e}_y 分别为 x 、 y 轴方向的单位偏振矢量。

一个消球差透镜会产生会聚到焦点的球面波, 因此孔径面上的幅度分布会被映射到球面波前上, 该类透镜的投影函数为 $r/f = \sin(\theta)$, f 为透镜的焦距。在透镜后的球面波前上^[46], 有

$$L_1(\theta, \varphi) = L_1(f \sin\theta, \varphi) \sqrt{\cos\theta}, \quad (15)$$

$$L_2(\theta, \varphi) = L_2(f \sin\theta, \varphi) \sqrt{\cos\theta}. \quad (16)$$

透镜对入射光场的折射会改变单位偏振矢量, 由图 6 可知, 折射后的单位偏振矢量变为 $\mathbf{e}'_r = \cos\theta(\cos\varphi\mathbf{e}_x + \sin\varphi\mathbf{e}_y) + \sin\theta\mathbf{e}_z$ 和 $\mathbf{e}'_\varphi = -\sin\varphi\mathbf{e}_x + \cos\varphi\mathbf{e}_y$, 其中 \mathbf{e}_z 为 z 轴方向的单位偏振矢量。根据 Richards-Wolf 方法, 焦点附近的电场可由对半径等于透镜焦距的球面波前的衍射积分给出:

$$\mathbf{E}(\rho, \phi, z) = \frac{jk}{2\pi} \int_0^{\theta_{\max}} d\theta \int_0^{2\pi} \mathbf{a}(\theta, \varphi) \exp(jk\mathbf{s} \cdot \mathbf{r}) \sin\theta d\varphi, \quad (17)$$

式中: θ_{\max} 为由透镜的数值孔径决定的最大仰角; 向量 $\mathbf{s} = (\sin\theta\cos\varphi, \sin\theta\sin\varphi, \cos\theta)$, $\mathbf{r} = (\rho\cos\phi, \rho\sin\phi, z)$; $\mathbf{a}(\theta, \varphi)$ 为场强因子, 其表达式为

$$\mathbf{a}(\theta, \varphi) = L_1(\theta, \varphi)\mathbf{e}'_r + L_2(\theta, \varphi)\mathbf{e}'_\varphi. \quad (18)$$

因此, 焦平面附近的光场分布为

$$\mathbf{E}(\rho, \phi, z) = \frac{j}{\lambda} \int_0^{\theta_{\max}} d\theta \int_0^{2\pi} \mathbf{B} \times \exp\{jk[z\cos\theta + \rho\sin\theta\cos(\varphi - \phi)]\} \sin\theta d\varphi, \quad (19)$$

式中参量 \mathbf{B} 的表达式为

$$\mathbf{B} = L_1(\theta, \varphi) \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\varphi \\ \cos\theta\sin\varphi \\ \sin\theta\mathbf{e}_z \end{bmatrix} + L_2(\theta, \varphi) \begin{bmatrix} -\sin\varphi \\ \cos\varphi \\ 0\mathbf{e}_z \end{bmatrix}. \quad (20)$$

5 定制激光焦场

矢量光场快速发展的主要驱动力之一是它们独特的聚焦特性, 控制焦场的矢量分布被广泛应用于偏振敏感定向成像、粒子操纵和加速、纳米尺度上光与物质的相互作用等。定制焦场的空间分布是光场调控领域研究的前沿热点之一, 世界各地的研究人员对此开展了大量的研究工作。Jahn 等^[89] 提出了一种基于矢量 Slepian 谐波和矢量 Slepian 多极场的方法, 用于处理高数值孔径聚焦问题, 以在焦点处获得特定的电场分布。Maluenda 等^[90] 根据 Richards-Wolf 矢量衍射理论反推透镜孔径面上的入射光场, 使焦场在焦点附近任意横截面上均为圆偏振。其他定制焦场的方法还包括几何投影法^[91]、逆傅里叶变换法^[92]、数字全息法^[93]、时间反演法^[94-97] 等。下面详细介绍焦场的强度分布、偏振指向及自旋指向定制方法。

5.1 强度分布定制

在图 6 所示的光场聚焦原理图中, 用(6)式所示的矢量光束作为入射光束, 通过调节参数 φ_0 可以控制焦场的强度分布, 在特定情况下能够形成二维平顶焦场^[98]。更进一步, 在透镜前加一个二元衍射光学元件(DOE)就可以调节入射光场的强度分布, 通过适当调节圆柱矢量光束的参数、透镜的数值孔径以及 DOE 的设计, 就可以获得在横向和纵向均为平顶分布的长焦深三维光场, 如图 7(a)所示^[99]。采用类似的方法, 亦可以获得光泡, 即其光场中心光强为零, 周围被强光场环绕, 如图 7(b)所示。

5.2 偏振指向定制

如图 8 所示^[100], 在透镜焦点处放置一个电耦极子来模拟焦场的偏振态, 电耦极子的振荡方向与焦场的偏振指向一致。若已知电耦极子的辐射方向图及偏振分布, 其辐射方向图就可以被消球差透镜收集并准直。结合 Richards-Wolf 矢量衍射理论可以得到透镜孔径面上的电场分布, 通常此电场具有非均匀的幅度和偏振分布。反过来, 以该电场作为入射场, 可以重建电耦极子左半部分的场分布, 进而可以得到所需的具有三维偏振分布的衍射极限焦场。

采用该方法原则上可以获得具有任意偏振指向的强聚焦场。以生成的在 xz 面内为 45° 线偏振的焦场为例, 透镜孔径面上的入射光场如图 9(a)所示。对应的强聚焦场如图 9(b)所示, 可见, 焦点附近具有均匀的 45° 线偏振分布。

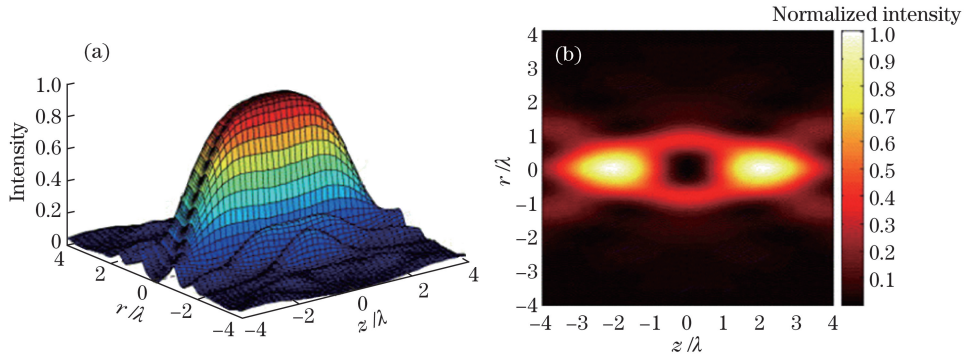


图 7 定制焦场的强度分布^[99]。(a)具有长焦深的三维平顶焦场；(b)光泡

Fig. 7 Intensity distributions of tailored focused field^[99]. (a) Three-dimensional flattop focused field with long depth of focus; (b) optical bubble

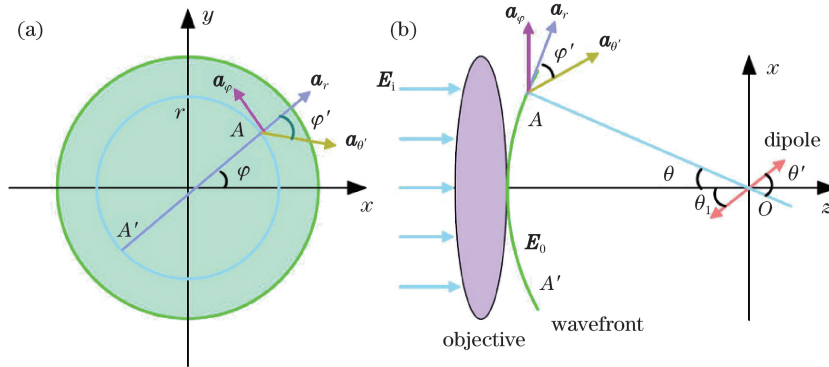


图 8 基于时间反演法的焦场偏振指向定制原理图^[100]。(a)孔径面光场分布；(b)光场反向聚焦

Fig. 8 Schematics of tailoring polarization distribution of focused optical field based on time reversal method^[100].

(a) Optical field distribution in pupil plane; (b) tightly focusing of reversed field

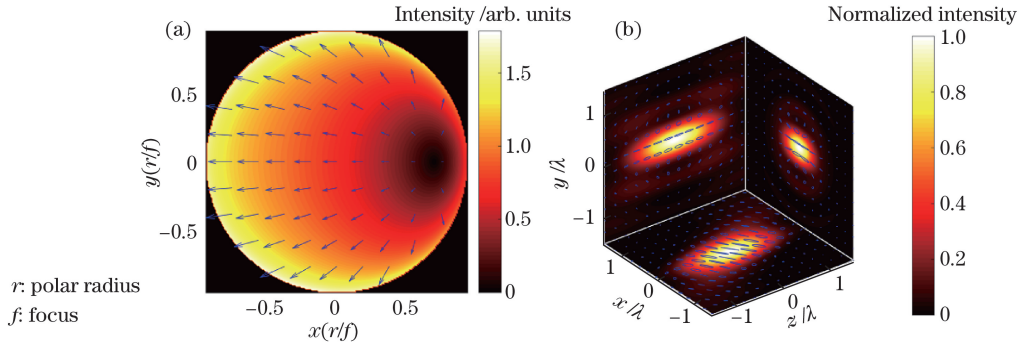


图 9 仿真得到的在 xz 面内为 45° 线偏振的焦场。(a)透镜孔径面上的入射场；(b)强聚焦场

Fig. 9 Focused field with 45° linear polarization in $x-z$ plane obtained by simulation.

(a) Incident field in pupil plane of lens; (b) tightly focused field

5.3 自旋指向定制

采用类似于图 8 中的方法可以定制焦场的自旋轴指向,此时需要在透镜的焦点处放置两个正交的电耦极子^[101-102],其中一个电耦极子的振荡方向沿着某个坐标轴,另一个电耦极子的振荡方向在与该坐标轴垂直的坐标面内。同时,两个电耦极子具有

π 的相位差。透镜收集并准直两个电耦极子的辐射方向,在孔径面内形成非均匀分布的矢量光场。以该矢量光场作为入射场,即可重构焦点处的电场分布,从而实现对焦场偏振指向的定制。生成自旋轴指向位于 $(90^\circ, 30^\circ, 60^\circ)$ 方向的强聚焦场的仿真结果如图 10 所示。

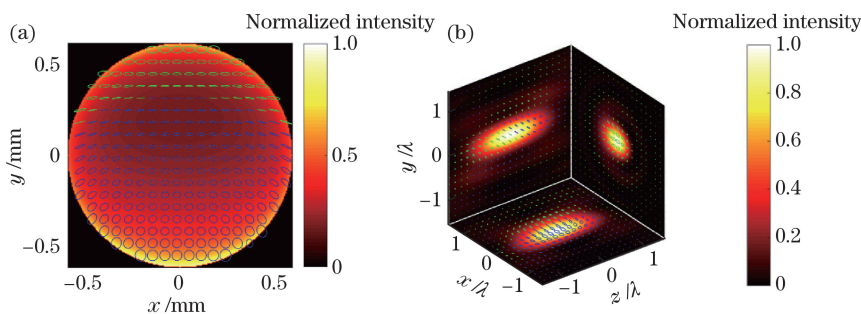


图 10 生成焦场自旋指向位于 $(90^\circ, 30^\circ, 60^\circ)$ 的仿真结果^[102]。(a)透镜孔径面上的入射场;(b)强聚焦场

Fig. 10 Simulated focused field with spin axis oriented at $(90^\circ, 30^\circ, 60^\circ)$ ^[102].

(a) Incident field in pupil plane of lens; (b) tightly focused field

6 焦场定制的应用

6.1 显微成像中的应用

某些特殊的矢量光场被高数值孔径的透镜聚焦后,焦场的 z 分量占主导地位,并决定焦斑的大小,通过直接测量和间接测量证实了这种强纵向焦场分量的存在^[103-104]。据报道,定制焦场的最小尺寸可达到 $0.161\lambda^2$,而在同等条件下,线性偏振光聚焦后的大小为 $0.26\lambda^2$ 。独特的矢量焦点分布在高分辨率成像中具有大量应用,例如共聚焦显微镜、双光子显微镜、二次谐波生成显微镜^[105]、三次谐波生成显微镜^[106]、暗场成像^[107]等。对于 4π 显微镜,通过类似于图 8 中的电耦辐射方向图,可以获得最小的球对称光斑^[108]。定制的强纵向场的一个应用是绘制单个分子的取向,实验装置及结果如图 11 所示^[109]。当被焦场的纵向分量激发时,不同分子空间取向的荧光辐射方向图是不同的。对于与纵向平行的分子(图 11 中 $\theta=0^\circ$),预期的荧光辐射方向图是对称的。当分子发生倾斜时,相应的辐射方向图变得扭曲且不对称。通过测量不对称性就可推断出分子的取向。

6.2 微纳加工中的应用

在三维空间中控制焦场强度及 SOP 分布在微纳加工中具有重要应用。与传统手段相比,激光微纳加工在生产率、加工精度、零件质量、材料利用率和灵活性等方面具有显著优势。基于有机-无机杂化材料中的双光子聚合技术,可将径向偏振超快激光束用于制备三维堆结构光子晶体,结果如图 12 所示^[110]。在阈值制备条件下,制备的聚合物棒的横向尺寸从 138 nm 减小到 100 nm,光子晶体的填充率减小了 17.35%。通过对比径向偏振照射和线性偏振照射下的禁止频带可以发现,在前一种情况下,透射光谱的抑制比更高,且波长范围更宽,这

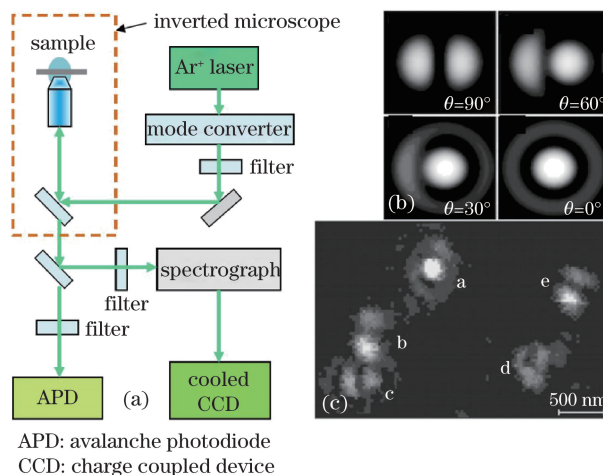


图 11 利用径向极化进行分子取向成像^[109]。

(a)实验装置;(b)荧光辐射理论结果;(c)实验结果

Fig. 11 Molecular orientation imaging by radial polarization^[109]. (a) Experimental setup; (b) theoretical results of fluorescent emission patterns; (c) experimental results

主要归功于径向偏振照射调整了三维光子晶体的填充率。

得益于受激辐射抑制(STED)光学超分辨显微技术的启发,双光束激光加工取得了巨大发展。双光束激光加工的基本原理是用一束激光(激发光)激发聚合反应过程,同时用另一束空间重叠的中空环形激光(抑制光)在激发光焦点周围抑制聚合反应,实现超衍射极限的激光加工^[111-112]。Kaschke等^[113]利用激光诱导光引发剂单态间的受激辐射来抑制聚合反应所需的单态至三态的跃迁,实现了 65 nm 线宽的加工能力。Li等^[114]利用光诱导电子迁移反应实现了抑制过程,得到了 40 nm 的轴向分辨率。Scott等^[43]利用抑制光和掺入抑制剂的作用产生反引发剂三重态,终止了聚合过程,极大地降低了抑制光的伴生热聚合作用。基于该原理,Gan等^[45]利用双光子光引发剂及单光子抑制剂实现了 9 nm 线宽

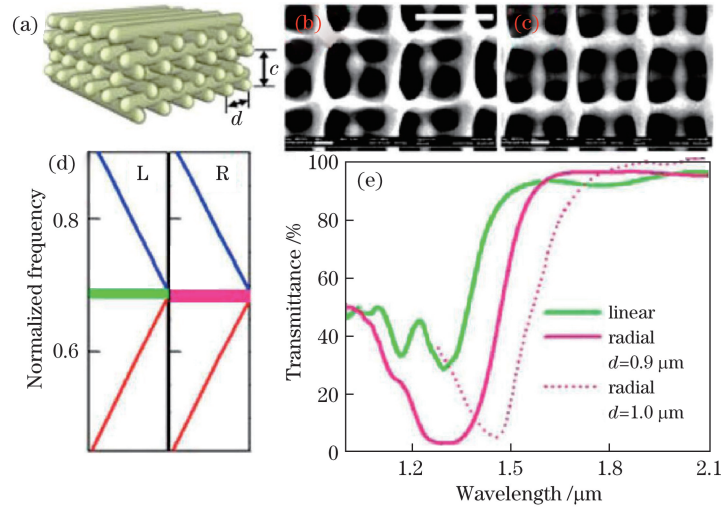


图 12 径向偏振光用于加工三维材堆结构光子晶体的结果^[110]。(a)材堆结构光子晶体的示意图;(b)线性偏振光束照射光子晶体的扫描电子显微镜照片;(c)径向偏振光束照射光子晶体的扫描电子显微镜照片;(d)计算得到的图(b)(c)中结构的 Γ -X 方向的能带图;(e)傅里叶变换红外光谱仪测量得到的光子晶体的透射光谱(实线)以及用径向偏振光制造的另一具有不同晶格常数的光子晶体的透射光谱(虚线)

Fig. 12 Fabrication results of 3D woodpile photonic crystal (PC) by radially polarized beams^[110]. (a) Schematic of woodpile PCs; (b) scanning electron microscopic image of PC fabricated with linearly polarized beam; (c) scanning electron microscopic image of PC fabricated with radially polarized beam; (d) calculated band diagrams in Γ -X direction of structures in (b) and (c); (e) transmission spectra (solid) of PCs and another PC with different lattice constants fabricated with radially polarized beam (dashed) measured by Fourier-transform infrared spectrometer

加工。Sun 等^[115]通过双光子非线性效应提高了材料阈值响应,实现了 50 nm 线宽加工。本课题组推测,激发光及抑制光的激光焦场定制会对双光束激光加工的分辨率和加工质量起到非常关键的作用,值得进一步深入研究。

6.3 定向耦合中的应用

Wolf 等^[87-88]在其著名的矢量衍射理论中曾明确指出:在光学聚焦系统的焦平面上,电场和磁场存在纵向分量,且纵向分量与横向分量具有 $\pi/2$ 的相位差,这意味着存在不为零的横向自旋角动量。随着纳米加工技术和微观表征技术的发展,研究人员已经能够在实验上观测到纯横向自旋角动量^[116]。纯横向自旋光场的自旋轴垂直于光束的传播方向,这一特殊光场可以被广泛应用于量子纳米光子学、集成光信号处理、定向耦合等领域。当纯横向自旋光场的传播方向反转时,其自旋改变符号。基于这一效应,Mitsch 等^[117]演示了激光捕获的铯原子将光子定向自发发射到纳米光纤中的现象,并通过原子发射体的激发态控制它们的传播方向;他们将自发发射调整为从对称到强不对称的反向传播导模,结果发现超过 90% 的光功率被耦合到某个单一方向。

6.4 粒子捕获中的应用

根据矢量光场的聚焦性质,焦场定制还可以被

应用于光学捕获。对于 CV 光束,当其被强聚焦后,焦场的纵向分量和横向分量具有 $\pi/2$ 的相位差,因此纵向分量没有平均功率,但仍然能储存电能。该性质对纳米颗粒的三维稳定捕获具有重要意义,尤其是金属颗粒^[19]。若使用径向极化的人射光束,更紧密的聚焦将提供更强的梯度力。因为坡印亭矢量的时间平均轴向分量消失,故散射力为零。将径向偏振光与衍射光学元件相配合,在强聚焦下可以形成光链,能够同时捕获多个粒子^[118]。径向偏振光也可以被用于粒子捕获,其对应的焦场因偏振对称而具有圆环形状,因此,比较适用于捕获折射率低于周围环境的颗粒或中空颗粒^[119]。角向偏振亦可用于捕获磁粒子,在悬浮液中直接捕获磁粒子将为磁流变行为的研究提供有价值的信息。

7 结束语

综述了矢量光场及激光焦场定制的最新进展,概述了矢量光场的原理及各种生成方法,详细介绍了基于 SLM 的矢量光场生成系统及其性能改进提升的方法。回顾了强聚焦下的矢量衍射理论,从强度分布、偏振指向及自旋指向三个方面介绍了激光焦场的定制方法,采用这些方法可以获得一系列具有特殊三维空间分布的强聚焦场。定制焦场所具有

的特殊性质使得其在显微成像、光刻、频移、电子加速、光学微操纵、材料加工、高分辨率计量、自旋控制的定向耦合、信息存储、光通信等领域具有广阔的应用前景。随着光场调控技术的进步,新的应用将会不断涌现。

参 考 文 献

- [1] Bliokh K Y, Rodríguez-Fortuño F J, Nori F, *et al.* Spin-orbit interactions of light[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(12): 796-808.
- [2] Zhan Q W, Leger J R. High-resolution imaging ellipsometer[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(22): 4443-4450.
- [3] Zhan Q W, Leger J R. Measurement of surface features beyond the diffraction limit with an imaging ellipsometer[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(10): 821-823.
- [4] Zhan Q W, Leger J R. Microellipsometer with radial symmetry[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(22): 4630-4637.
- [5] Zijlstra P, Chon J W M, Gu M. Five-dimensional optical recording mediated by surface plasmons in gold nanorods[J]. *Nature*, 2009, 459(7245): 410-413.
- [6] Li X P, Zhang Q M, Chen X, *et al.* Giant refractive-index modulation by two-photon reduction of fluorescent graphene oxides for multimode optical recording[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 2819.
- [7] Gu M, Li X P, Cao Y Y. Optical storage arrays: a perspective for future big data storage [J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(5): e177.
- [8] Ren H R, Li X P, Gu M. Polarization-multiplexed multifocal arrays by a π -phase-step-modulated azimuthally polarized beam[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(24): 6771-6774.
- [9] Dolan P R, Li X P, Stortebom J, *et al.* Complete determination of the orientation of NV centers with radially polarized beams[J]. *Optics Express*, 2014, 22(4): 4379-4387.
- [10] Li X P, Lan T H, Tien C H, *et al.* Three-dimensional orientation-unlimited polarization encryption by a single optically configured vectorial beam[J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 998.
- [11] Simon H J, Bloembergen N. Second-harmonic light generation in crystals with natural optical activity[J]. *Physical Review*, 1968, 171(3): 1104-1114.
- [12] Konishi K, Higuchi T, Li J, *et al.* Polarization-controlled circular second-harmonic generation from metal hole arrays with threefold rotational symmetry[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(13): 135502.
- [13] Libster-Hershko A, Trajtenberg-Mills S, Arie A. Dynamic control of light beams in second harmonic generation[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(9): 1944-1947.
- [14] Čižmár T, Mazilu M, Dholakia K. *In situ* wavefront correction and its application to micromanipulation[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(6): 388-394.
- [15] Grier D G. A revolution in optical manipulation[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 810-816.
- [16] Liesener J, Reicherter M, Haist T, *et al.* Multifunctional optical tweezers using computer-generated holograms[J]. *Optics Communications*, 2000, 185(1): 77-82.
- [17] Eriksen R L, Daria V R, Rodrigo P J, *et al.* Computer-controlled orientation of multiple optically-trapped microscopic particles [J]. *Microelectronic Engineering*, 2003, 67(68): 872-878.
- [18] Skelton S E, Sergides M, Saija R, *et al.* Trapping volume control in optical tweezers using cylindrical vector beams[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(1): 28-30.
- [19] Zhan Q W. Trapping metallic Rayleigh particles with radial polarization[J]. *Optics Express*, 2004, 12(15): 3377-3382.
- [20] Liang Y S, Yao B L, Lei M, *et al.* Optical micro-manipulation based on spatial modulation of optical fields[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1026003.
梁言生, 姚保利, 雷铭, 等. 基于空间光场调控技术的光学微操纵 [J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1026003.
- [21] Zhao Y Q, Edgar J S, Jeffries G D M, *et al.* Spin-to-orbital angular momentum conversion in a strongly focused optical beam [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(7): 073901.
- [22] Marrucci L. Spin gives direction[J]. *Nature Physics*, 2015, 11(1): 9-10.
- [23] Espinosa-Soria A, Rodríguez-Fortuño F J, Griol A, *et al.* On-chip optimal Stokes nanopolarimetry based on spin-orbit interaction of light[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(5): 3139-3144.
- [24] Rodríguez-Herrera O G, Lara D, Bliokh K Y, *et al.* Optical nanoprobe via spin-orbit interaction of light[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(25): 253601.
- [25] Aiello A, Banzer P, Neugebauer M, *et al.* From transverse angular momentum to photonic wheels[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(12): 789-795.
- [26] Cardano F, Marrucci L. Spin-orbit photonics[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(12): 776-778.
- [27] Pichler H, Ramos T, Daley A J, *et al.* Quantum

- optics of chiral spin networks[J]. *Physical Review A*, 2015, 91(4): 042116.
- [28] Neugebauer M, Bauer T, Banzer P, *et al.* Polarization tailored light driven directional optical nanobeacon[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(5): 2546-2551.
- [29] Rodríguez-Fortuño F J, Marino G, Ginzburg P, *et al.* Near-field interference for the unidirectional excitation of electromagnetic guided modes[J]. *Science*, 2013, 340(6130): 328-330.
- [30] Petersen J, Volz J, Rauschenbeutel A. Chiral nanophotonic waveguide interface based on spin-orbit interaction of light[J]. *Science*, 2014, 346(6205): 67-71.
- [31] Rubinsztein-Dunlop H, Forbes A, Berry M V, *et al.* Roadmap on structured light[J]. *Journal of Optics*, 2016, 19(1): 013001.
- [32] Bauer T, Orlov S, Peschel U, *et al.* Nanointerferometric amplitude and phase reconstruction of tightly focused vector beams[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(1): 23-27.
- [33] Bliokh K Y, Nori F. Transverse and longitudinal angular momenta of light[J]. *Physics Reports*, 2015, 592: 1-38.
- [34] Yang S Y, Zhan Q W. Third-harmonic generation microscopy with tightly focused radial polarization[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2008, 10(12): 125103.
- [35] Lieb M A, Zavislan J M, Novotny L. Single-molecule orientations determined by direct emission pattern imaging[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2004, 21(6): 1210-1215.
- [36] Shitrit N, Yulevich I, Maguid E, *et al.* Spin-optical metamaterial route to spin-controlled photonics[J]. *Science*, 2013, 340(6133): 724-726.
- [37] Chen J, Wan C H, Zhan Q W. Vectorial optical fields: recent advances and future prospects [J]. *Science Bulletin*, 2018, 63(1): 54-74.
- [38] Gibson G, Courtial J, Padgett M J, *et al.* Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2004, 12(22): 5448-5456.
- [39] Willner A E, Huang H, Yan Y, *et al.* Optical communications using orbital angular momentum beams[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(1): 66-106.
- [40] Cheng W, Haus J W, Zhan Q W. Propagation of vector vortex beams through a turbulent atmosphere[J]. *Optics Express*, 2009, 17(20): 17829-17836.
- [41] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, *et al.* Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 488-496.
- [42] Bozinovic N, Yue Y, Ren Y, *et al.* Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers[J]. *Science*, 2013, 340(6140): 1545-1548.
- [43] Scott T F, Kowalski B A, Sullivan A C, *et al.* Two-color single-photon photoinitiation and photoinhibition for subdiffraction photolithography [J]. *Science*, 2009, 324(5929): 913-917.
- [44] Liu S, Li P, Zhang Y, *et al.* Transmission and control of polarization modulation light filed in free space [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1026001.
刘圣, 李鹏, 章毅, 等. 自由空间中偏振调制光场的传输及控制[J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1026001.
- [45] Gan Z S, Cao Y Y, Evans R A, *et al.* Three-dimensional deep sub-diffraction optical beam lithography with 9 nm feature size[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2061.
- [46] Zhan Q W. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2009, 1(1): 1-57.
- [47] Zhan Q W. Vectorial optical fields: fundamentals and applications[M]. Singapore: World Scientific, 2013: 1-24.
- [48] Forbes A. Laser beam propagation: generation and propagation of customized light [M]. Boca Raton: CRC Press, 2014: 239-272.
- [49] Brown T, Zhan Q W. Introduction: unconventional polarization states of light focus issue [J]. *Optics Express*, 2010, 18(10): 10775-10776.
- [50] Zhan Q W, Forbes A. Editorial for special issue on complex optical fields [J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(3): 030001.
- [51] Yuan X C, Yu S Y, Urbach H P. Optical vortices and vector beams[J]. *Photonics Research*, 2016, 4(5): OVB1.
- [52] Omatsu T, Litchinitser N M, Brasselet E, *et al.* Focus issue introduction: synergy of structured light and structured materials[J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 16681-16685.
- [53] Hall D G. Vector-beam solutions of Maxwell's wave equation[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(1): 9-11.
- [54] Beckley A M, Brown T G, Alonso M A. Full poincaré beams[J]. *Optics Express*, 2010, 18(10): 10777-10785.
- [55] Yonezawa K, Kozawa Y, Sato S. Generation of a radially polarized laser beam by use of the birefringence of a C-cut Nd:YVO₄ crystal[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(14): 2151-2153.

- [56] MacHavariani G, Lumer Y, Moshe I, *et al.* Birefringence-induced bifocusing for selection of radially or azimuthally polarized laser modes[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(16): 3304-3310.
- [57] Yonezawa K, Kozawa Y, Sato S. Compact laser with radial polarization using birefringent laser medium[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, 46(8A): 5160-5163.
- [58] Bisson J F, Li J, Ueda K, *et al.* Radially polarized ring and arc beams of a neodymium laser with an intra-cavity axicon[J]. *Optics Express*, 2006, 14(8): 3304-3311.
- [59] Pohl D. Operation of a ruby laser in the purely transverse electric mode TE₀₁ [J]. *Applied Physics Letters*, 1972, 20(7): 266-267.
- [60] Erdogan T, King O, Wicks G W, *et al.* Circularly symmetric operation of a concentric-circle-grating, surface-emitting, AlGaAs/GaAs quantum-well semiconductor laser [J]. *Applied Physics Letters*, 1992, 60(16): 1921-1923.
- [61] Ahmed M A, Voss A, Vogel M M, *et al.* Multilayer polarizing grating mirror used for the generation of radial polarization in Yb:YAG thin-disk lasers [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(22): 3272-3274.
- [62] Cui X Q, He Z W, Zhang W D, *et al.* Linear-cavity cylindrical vector lasers based on all-fiber mode converters[J]. *Optics Communications*, 2018, 427: 306-310.
- [63] Zhang X C, Zhang W D, Li C Y, *et al.* All-fiber cylindrical vector beams laser based on an acoustically-induced fiber grating[J]. *Journal of Optics*, 2018, 20(7): 075608.
- [64] Ngcobo S, Litvin I, Burger L, *et al.* A digital laser for on-demand laser modes[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2289.
- [65] Zhou R J, Ibarra-Escamilla B, Haus J W, *et al.* Fiber laser generating switchable radially and azimuthally polarized beams with 140 mW output power at 1.6 μm wavelength [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(19): 191111.
- [66] Zhan Q W, Leger J R. Interferometric measurement of the geometric phase in space-variant polarization manipulations [J]. *Optics Communications*, 2002, 213(4/5/6): 241-245.
- [67] Yamaguchi R, Nose T, Sato S. Liquid crystal polarizers with axially symmetrical properties[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1989, 28(9): 1730-1731.
- [68] Stalder M, Schadt M. Linearly polarized light with axial symmetry generated by liquid-crystal polarization converters[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(23): 1948-1950.
- [69] Passilly N, Treussart F, Hierle R, *et al.* Simple interferometric technique for generation of a radially polarized light beam[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2005, 22(5): 984-991.
- [70] Wang X L, Ding J P, Ni W J, *et al.* Generation of arbitrary vector beams with a spatial light modulator and a common path interferometric arrangement[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(24): 3549-3551.
- [71] Beversluis M R, Novotny L, Stranick S J. Programmable vector point-spread function engineering [J]. *Optics Express*, 2006, 14(7): 2650-2656.
- [72] Waller E H, von Freymann G. Independent spatial intensity, phase and polarization distributions[J]. *Optics Express*, 2013, 21(23): 28167-28174.
- [73] Tripathi S, Toussaint K C. Versatile generation of optical vector fields and vector beams using a non-interferometric approach[J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 10788-10795.
- [74] Moreno I, Iemmi C, Campos J, *et al.* Jones matrix treatment for optical Fourier processors with structured polarization [J]. *Optics Express*, 2011, 19(5): 4583-4594.
- [75] Maurer C, Jesacher A, Fürhapter S, *et al.* Tailoring of arbitrary optical vector beams[J]. *New Journal of Physics*, 2007, 9(3): 78.
- [76] Maluenda D, Juvells I, Martínez-Herrero R, *et al.* Reconfigurable beams with arbitrary polarization and shape distributions at a given plane[J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 5432-5439.
- [77] Kenny F, Lara D, Rodríguez-Herrera O G, *et al.* Complete polarization and phase control for focus-shaping in high-NA microscopy[J]. *Optics Express*, 2012, 20(13): 14015-14029.
- [78] Moreno I, Davis J A, Hernandez T M, *et al.* Complete polarization control of light from a liquid crystal spatial light modulator [J]. *Optics Express*, 2012, 20(1): 364-376.
- [79] Ma C J, Di J L, Zhang Y, *et al.* Reconstruction of structured laser beams through a multimode fiber based on digital optical phase conjugation[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(14): 3333-3336.
- [80] Chen Z Z, Zeng T T, Qian B J, *et al.* Complete shaping of optical vector beams[J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 17701-17710.
- [81] Ping C C, Liang C H, Wang F, *et al.* Radially polarized multi-Gaussian Schell-model beam and its tight focusing properties[J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 32475-32490.
- [82] Liu S, Qi S X, Zhang Y, *et al.* Highly efficient generation of arbitrary vector beams with tunable polarization, phase, and amplitude[J]. *Photonics*

- Research, 2018, 6(4): 228-233.
- [83] Han W, Yang Y F, Cheng W, *et al.* Vectorial optical field generator for the creation of arbitrarily complex fields[J]. Optics Express, 2013, 21(18): 20692-20706.
- [84] Chen J, Wan C H, Kong L J, *et al.* Precise transverse alignment of spatial light modulator sections for complex optical field generation[J]. Applied Optics, 2017, 56(10): 2614-2620.
- [85] Han W, Cheng W, Zhan Q W. Design and alignment strategies of $4f$ systems used in the vectorial optical field generator[J]. Applied Optics, 2015, 54(9): 2275-2278.
- [86] Chen J, Kong L J, Zhan Q W. Demonstration of a vectorial optical field generator with adaptive close loop control[J]. Review of Scientific Instruments, 2017, 88(12): 125111.
- [87] Wolf E. Electromagnetic diffraction in optical systems. I. An integral representation of the image field[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1959, 253(1274): 349-357.
- [88] Richards B, Wolf E. Electromagnetic diffraction in optical systems. II. Structure of the image field in an aplanatic system [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1959, 253(1274): 358-379.
- [89] Jahn K, Bokor N. Solving the inverse problem of high numerical aperture focusing using vector Slepian harmonics and vector Slepian multipole fields [J]. Optics Communications, 2013, 288: 13-16.
- [90] Maluenda D, Martínez-Herrero R, Juvells I, *et al.* Synthesis of highly focused fields with circular polarization at any transverse plane[J]. Optics Express, 2014, 22(6): 6859-6867.
- [91] Martínez-Herrero R, Juvells I, Carnicer A. On the physical realizability of highly focused electromagnetic field distributions[J]. Optics Letters, 2013, 38(12): 2065-2067.
- [92] Chen Z Z, Zeng T T, Ding J P. Reverse engineering approach to focus shaping[J]. Optics Letters, 2016, 41(9): 1929-1932.
- [93] Chen R P, Chen Z Z, Chew K H, *et al.* Structured caustic vector vortex optical field: manipulating optical angular momentum flux and polarization rotation[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 10628.
- [94] Wang J M, Chen W B, Zhan Q W. Creation of uniform three-dimensional optical chain through tight focusing of space-variant polarized beams[J]. Journal of Optics, 2012, 14(5): 055004.
- [95] Wang J M, Chen W B, Zhan Q W. Three-dimensional focus engineering using dipole array radiation pattern[J]. Optics Communications, 2011, 284(12): 2668-2671.
- [96] Chen W B, Zhan Q W. Three dimensional polarization control in 4π microscopy[J]. Optics Communications, 2011, 284(1): 52-56.
- [97] Wang J M, Chen W B, Zhan Q W. Engineering of high purity ultra-long optical needle field through reversing the electric dipole array radiation[J]. Optics Express, 2010, 18(21): 21965-21972.
- [98] Zhan Q W, Leger J. Focus shaping using cylindrical vector beams [J]. Optics Express, 2002, 10(7): 324-331.
- [99] Chen W B, Zhan Q W. Three-dimensional focus shaping with cylindrical vector beams [J]. Optics Communications, 2006, 265(2): 411-417.
- [100] Chen W B, Zhan Q W. Diffraction limited focusing with controllable arbitrary three-dimensional polarization [J]. Journal of Optics, 2010, 12(4): 045707.
- [101] Chen J, Wan C H, Kong L J, *et al.* Experimental generation of complex optical fields for diffraction limited optical focus with purely transverse spin angular momentum[J]. Optics Express, 2017, 25(8): 8966-8974.
- [102] Chen J, Wan C H, Kong L J, *et al.* Tightly focused optical field with controllable photonic spin orientation[J]. Optics Express, 2017, 25(16): 19517-19528.
- [103] Jia B H, Gan X S, Gu M. Direct measurement of a radially polarized focused evanescent field facilitated by a single LCD[J]. Optics Express, 2005, 13(18): 6821-6827.
- [104] Hao B, Leger J. Experimental measurement of longitudinal component in the vicinity of focused radially polarized beam[J]. Optics Express, 2007, 15(6): 3550-3556.
- [105] Biss D P, Brown T G. Polarization-vortex-driven second-harmonic generation[J]. Optics Letters, 2003, 28(11): 923-925.
- [106] Carrasco S, Saleh B E A, Teich M C, *et al.* Second- and third-harmonic generation with vector Gaussian beams[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2006, 23(10): 2134-2141.
- [107] Biss D P, Youngworth K S, Brown T G. Dark-field imaging with cylindrical-vector beams[J]. Applied Optics, 2006, 45(3): 470-479.
- [108] Bokor N, Davidson N. Toward a spherical spot distribution with 4π focusing of radially polarized light[J]. Optics Letters, 2004, 29(17): 1968-1970.
- [109] Novotny L, Beversluis M R, Youngworth K S, *et*

- al.* Longitudinal field modes probed by single molecules[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 86(23): 5251.
- [110] Jia B H, Kang H, Li J F, *et al.* Use of radially polarized beams in three-dimensional photonic crystal fabrication with the two-photon polymerization method[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(13): 1918-1920.
- [111] Rittweger E, Han K Y, Irvine S E, *et al.* STED microscopy reveals crystal colour centres with nanometric resolution[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(3): 144-147.
- [112] Willig K I, Harke B, Medda R, *et al.* STED microscopy with continuous wave beams[J]. *Nature Methods*, 2007, 4(11): 915-918.
- [113] Kaschke J, Wegener M. Gold triple-helix mid-infrared metamaterial by STED-inspired laser lithography[J]. *Optics Letters*, 2015, 40 (17): 3986-3989.
- [114] Li L, Gattass R R, Gershgoren E, *et al.* Achieving $\lambda/20$ resolution by one-color initiation and deactivation of polymerization [J]. *Science*, 2009, 324(5929): 910-913.
- [115] Sun Z B, Dong X Z, Chen W Q, *et al.* Multicolor polymer nanocomposites: *in situ* synthesis and fabrication of 3D microstructures[J]. *Advanced Materials*, 2008, 20(5): 914-919.
- [116] Banzer P, Neugebauer M, Aiello A, *et al.* The photonic wheel-demonstration of a state of light with purely transverse angular momentum[J]. *Journal of the European Optical Society: Rapid Publications*, 2013, 8: 13032.
- [117] Mitsch R, Sayrin C, Albrecht B, *et al.* Quantum state-controlled directional spontaneous emission of photons into a nanophotonic waveguide[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5713.
- [118] Zhao Y Q, Zhan Q W, Zhang Y L, *et al.* Creation of a three-dimensional optical chain for controllable particle delivery[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(8): 848-850.
- [119] Zhan Q W. Radiation forces on a dielectric sphere produced by highly focused cylindrical vector beams[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2003, 5(3): 229-232.